

改进型 A 星算法引导的核辐射环境路径规划

陶龙龙^{1,2} 龙鹏程¹ 郑晓磊¹ 杨子辉¹ 尚雷明¹ 何桃¹

¹ (中国科学院核能安全技术研究所 中子输运理论与辐射安全重点实验室 合肥 230031)

² (中国科学技术大学 合肥 230027)

摘要 为减少辐射危害,提出一种改进型 A 星算法引导的核辐射环境路径规划方法。该方法综合考虑辐射场剂量率、障碍物和最短路径等约束条件,采用累积剂量作为实际代价,用预估剂量作为估计代价来引导最优路径。在同一核辐射环境下,利用改进型 A 星算法得到的路径长度和总剂量代价分别为 29.3 m 和 1.0 mSv,利用传统 A 星算法得到的路径长度和总剂量代价分别为 24.1 m 和 28.8 mSv。仿真结果初步表明,改进型 A 星算法引导的路径更加安全、可靠,可应用于核辐射环境下的路径规划。

关键词 路径规划, A 星算法, 辐射环境, 可视化, 累积剂量

中图分类号 TL72, TL77

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.060601

An improved A* algorithm-guided path-planning method for radioactive environment

TAO Longlong^{1,2} LONG Pengcheng¹ ZHENG Xiaolei¹ YANG Zihui¹ SHANG Leiming¹ HE Tao¹

¹(Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

²(University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

ABSTRACT People working in a radiation environment are at risk of radiation exposure. To minimize radiation hazards, an improved A* algorithm-guided path-planning method for radioactive environments is proposed. The method considers the radiation dose rate, obstacles, and shortest path constraint conditions and uses the cumulative dose as the actual cost and the estimated dose as the estimated cost to determine the optimal path. In the same radiation environment, the path length and total dose cost obtained by the improved A* algorithm are 29.3 m and 1.0 mSv, respectively, whereas that obtained via the traditional A* algorithm are 24.1 m and 28.8 mSv, respectively. Simulation results demonstrate that the path guided by the improved A* algorithm is safer and more reliable, and it

基金资助: 中国科学院信息化项目(XXH13506-104)、国家科技部国家科技基础条件平台项目“国家基础科学数据共享服务平台”(DKA2017-12-02-17)、国家磁约束核聚变能发展研究专项项目(2014GB112000)、中国科学院青年创新促进会专项项目及产业化基金资助

第一作者: 陶龙龙, 男, 1993年4月出生, 2017年获安徽理工大学学士学位, 目前为中国科学技术大学硕士研究生在读, 核能科学与工程专业, E-mail: llt2017@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 龙鹏程, 博士, 研究员, E-mail: pengcheng.long@fds.org.cn

收稿日期: 初稿 2018-08-25; 修回 2018-11-27

Supported by the Informatization Project of Chinese Academy of Sciences (XXH13506-104), the National R&D Infrastructure and Facility Development Program of China-Fundamental Science Data Sharing Platform (DKA2017-12-02-17), the National Magnetic Confinement Fusion Science Program of China(2014GB112000), the Special Project of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences and the Industrialization Fund

First author: TAO Longlong (male) was born in April 1993, and obtained his bachelor's degree from Anhui University of Science and Technology of China in 2017. Now he is a master candidate at University of Science and Technology of China, majoring in nuclear science and engineering. E-mail: llt2017@mail.ustc.edu.cn

Corresponding author: Ph.D. LONG Pengcheng, professor, E-mail: pengcheng.long@fds.org.cn

Received 25 August 2018; accepted 27 November 2018

can be applied to path planning in a nuclear radiation environment.

KEYWORDS Path planning, A* algorithm, Radiation environment, Visualization, Cumulative dose

CLC TL72, TL77

在核动力厂辐射控制区等典型的放射性工作环境下,工作人员存在接受放射性辐射照射的风险。由于辐射是不可见的,也不能直接被人体感知,大大增加了人员暴露于放射性环境中的风险^[1]。同时,由于工作人员不清楚辐射源的辐射分布,在辐射工作场所内活动时,只能根据以往经验进行粗略的定性路径规划,使得工作人员在设备检修、更换、清洗、退役时,造成个人受照剂量超标。按照《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249-2011)中关于辐射实践正当化、辐射防护最优化、个人剂量当量限值三原则,有必要借助于相应的辅助决策技术,对工作在辐射环境下的人员进行精确的路径规划,以确保其人身安全。

A 星算法(也称为 A* 算法)是基于 Dijkstra 算法的一种典型的^[2]、启发式的最短路径搜索算法,其本质是从起点开始搜索代价值最小的节点作为下一次搜索的起点,直到搜索到目标节点为止,由于搜索从一开始就保证代价估计值是最小的,最终得到的路径代价值也最小^[3-4]。目前,基于 A 星算法的路径规划研究大多集中在自主移动机器人领域^[2-6],且部分研究只考虑到路径最短问题。对于工作在辐射环境下人员的路径规划研究很少,且忽略放射性辐射源对工作人员的辐射危害,特别是超过职业照射剂量限值的辐射^[7]。

本文提出一种改进型 A 星算法引导的核辐射环境路径规划方法,以满足人员在辐射环境下的最优路径规划需求。

1 改进型 A 星算法引导的路径规划方法

A 星算法的成功与否主要依赖于代价估计函数,通过估价函数 $F(n)$ 来引导算法的搜索方向,避免遍历所有可能的路径,减少了计算量,提高了计算效率。其估价函数可定义为(1)式:

$$F(n)=G(n)+H(n) \quad (1)$$

式中: $F(n)$ 是从起始节点经由候选节点最终到达目标节点的总的代价估计; $G(n)$ 是从起始节点到达候选节点的实际代价估计; $H(n)$ 是从当前预处理的候选节点到目标节点的启发式估计代价函数。

A 星算法搜索方向分为四方向搜索和八方向搜索^[3],为提高精度,本文采用八方向搜索,八方向搜索为二维空间情况下的一种典型搜索方法,如图 1 中左侧及中间区域所示。相比于传统 A 星算法只考虑障碍物和最短距离的情况,改进型 A 星算法综合考虑非均匀辐射场剂量率、累积剂量、最短路径和障碍物 4 个因素,在工程应用中更具有优势和参考意义。传统的 A 星算法进行最优路径搜索时,只考虑障碍物和距离的约束,以最短距离作为估计代价引导路径。改进型 A 星算法引导的核辐射环境路径规划方法,不仅考虑核辐射场的剂量率和障碍物的存在对人员安全和行进的影响,而且考虑如何在设定的剂量率限值内快速找出剂量代价最小的路径。因此,以累积剂量^[8-9]作为实际代价 $G(n)$,以预估剂量作为估计代价 $H(n)$,计算过程总剂量代价 $F(n)$,并进行路径引导。为了解决工作人员在非均匀辐射场中剂量率超标问题,在改进型 A 星算法中设置剂量率限值,搜索中遇到超过安全限值的网格,当作障碍物处理。

1.1 实际剂量代价 $G(n)$ 的估计

用任意两个网格节点之间的累积剂量表示实际代价 $G(n)$,通过每个网格的剂量率和行进时间的乘积计算。二维网格平面中,两个相邻网格节点之间累积剂量模型如图 1 中左上方区域所示^[4],图中红色中心为候选节点,1、2、3、4、5、6、7、8 为候选节点的八个方向拓展节点,则从起始节点 S 到候选节点 N 的实际剂量代价可通过(2)式进行估计。

$$G(n)=\frac{l}{v} \times \frac{\delta_k}{2} \sum_{k=1}^{n-1} (D_k(x, y) + D_{k+1}(x, y)) \quad (2)$$

式中: $G(n)$ 为起始节点 S 到候选节点 N 的实际剂量代价(mSv); $D_k(x, y)$ 、 $D_{k+1}(x, y)$ 分别为网格节点 k 、 $k+1$ 处的剂量率(mSv/h); l 为每个网格单元的边长(m); v 为人员行进速度(m/h); 当两个相邻网格节点为水平或垂直位置关系时,如图 1 中 1、3、5、7 网格所示方位, δ_k 取 1.0; 当两个相邻网格节点为对角线位置关系时,如图 1 中 2、4、6、8 网格所示方位, δ_k 取 1.4。

1.2 预估剂量代价 $H(n)$ 的估计

用候选节点至目标节点的预估剂量表示估计代价 $H(n)$ ，通过蒙特卡罗算法求得的辐射场平均剂量率与候选节点至总目标节点最短时间的乘积进行估计。蒙特卡罗随机采样区域被定义为拓展节点与目标节点连线所构成的矩形，如图 1 右上方蓝色阴影区域所示。图中 N 为候选节点， G 为目标节点， $m1$ 、 $m2$ 、 $m3$ 为拓展节点。假设人员行进速度恒定，则最短时间可等效为最短路径，最短路径估计示意图如图 1 右下方所示， w 和 h 分别为候选节点与目标

节点之间的水平、垂直距离， $\min(h, w)$ 函数的主要功能是提取 h 、 w 中的最小值，最短路径公式如(3)式所示。对于 $M \times N$ 的网格，其预估剂量代价 $H(n)$ 可以根据(4)式进行估计， (x, y) 为拓展节点的坐标， $(x=1, 2, 3 \dots M, y=1, 2, 3 \dots N)$ 。

$$l_{\min} = h + w - 2 \min(h, w) + \sqrt{2} \min(h, w) \quad (3)$$

$$H(n) = \frac{l_{\min}}{v} \times \frac{1}{(M-x+1)(N-y+1)} \sum_{j=y}^N \sum_{i=x}^M D_k(i, j) \quad (4)$$

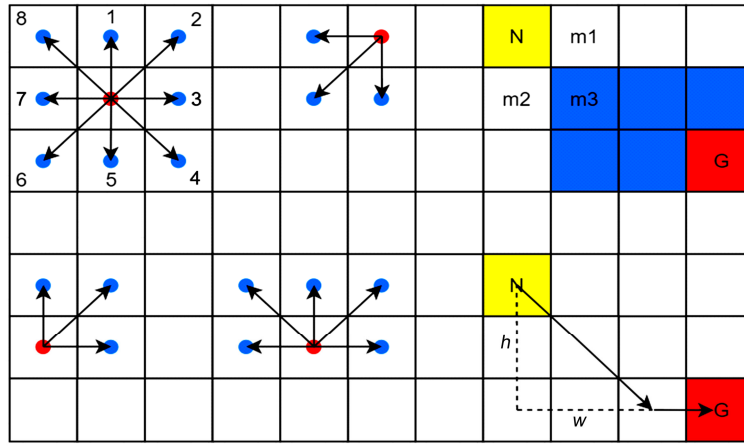


图 1 改进型 A 星算法路径引导原理图
Fig.1 Path-guided schematic of improved A* algorithm

1.3 总剂量代价 $F(n)$ 的估计

人员总剂量代价 $F(n)$ 的估计为实际剂量代价 $G(n)$ 与预估剂量代价 $H(n)$ 的估价之和，如(5)式所示。

$$F(n) = \frac{l}{v} \times \frac{\delta_k}{2} \sum_{k=1}^{n-1} (D_k(x, y) + D_{k+1}(x, y)) + \frac{l_{\min}}{v} \times \frac{1}{(M-x+1)(N-y+1)} \sum_{j=y}^N \sum_{i=x}^M D_k(i, j) \quad (5)$$

式中： $F(n)$ 为从起始节点 S 至目标节点 G 的人员总剂量代价估计(mSv)。

1.4 平均剂量代价计算

路径规划完成后，必要的是进行路径回溯并计算出全过程最大剂量率、最小剂量率、所走过的路径长度，进而求出行进时间、总剂量代价和平均剂量代价，以精确比较改进型 A 星算法与传统 A 星算

法规划出的路径优劣。针对存在障碍物的二维平面中的两个点，相比于曼哈顿距离和切比雪夫距离，欧氏距离最能代表实际情况中两点间的距离^[3,10]。因此，本文采用欧式距离表示人员实际走过的路径长度，根据(2)式计算出从起点 S 到终点 G 全过程的总剂量代价，再结合行进时间，可以计算出全过程人员的平均剂量代价 $\overline{D_{S \rightarrow G}}$ (mSv)，如(6)式所示。

$$\overline{D_{S \rightarrow G}} = \frac{l}{2} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(D_k(x, y) + D_{k+1}(x, y)) \times \delta_k}{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}} \quad (6)$$

式中： (x_k, y_k) 和 (x_{k+1}, y_{k+1}) 为所走过的路径中任意两个相邻的网格节点坐标。

2 案例仿真

2.1 辐射环境可视化

为了对本文提出的路径规划方法进行验证，基

于 FDS 凤麟核能团队^[11-13]自主研发的仿真平台^[14-16]实现算法并进行仿真模拟^[17-18], 该团队在先进反应堆概念设计^[19-20]、抗辐照材料^[21-23]、中子源^[24-25]以及聚变安全^[26]等方面都开展了深入的研究。选取国内某一压水堆核电厂厂房典型辐射区域作为研究对象。首先根据实际应用场景将 20 m×10 m 的辐射区域划分为 800×400 的网格, 并定义各个网格为实体, 取 1.6 m 标高下水平切面上离散的网格点代表该平面内二维剂量场分布^[27-29], 利用实际监测数据^[30]实现二维不均匀剂量场可视化 (如图 2 所示)。最后,

分别用传统 A 星算法和改进型 A 星算法在同一辐射环境下进行路径规划, 显示路径并计算全过程最大剂量率、最小剂量率、行进距离、总剂量代价和平均剂量代价 (行进速度取 3 600 m/h)。

2.2 仿真结果及分析

案例仿真实验结果如图 2 所示, 图 2 中, S 为起点, G 为终点, Path 1 为传统 A 星算法规划出的路径, Path 2 为改进型 A 星算法规划出的路径。表 1 为两种不同算法仿真模拟数据对比表。

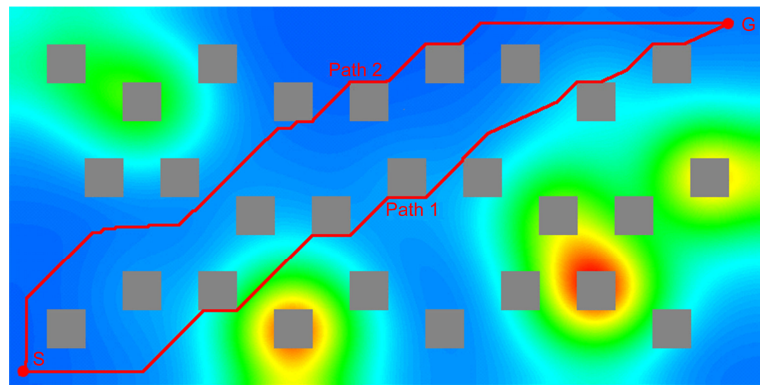


图 2 传统 A 星算法与改进型 A 星算法路径规划仿真
Fig.2 Path-planning simulation of traditional A* algorithm and improved A* algorithm

表 1 传统 A 星算法与改进 A 星型算法仿真模拟数据对比
Table 1 Data comparison of traditional A* algorithm and improved A* algorithm simulation

算法 Algorithm	最小剂量率 Minimum dose rate / mSv·h ⁻¹	最大剂量率 Maximum dose rate / mSv·h ⁻¹	行走距离 Distance / m	行进时间 Time / s	总剂量代价 Total dose cost / mSv	平均剂量代价 Average dose cost / mSv·h ⁻¹
传统 A 星 Traditional A*	14.8	121.6	24.1	24.1	28.8	4 302.1
改进型 A 星 Improved A*	7.8	9.5	29.3	29.3	1.0	122.9

通过对比两种算法仿真模拟结果, 可以得到: 传统 A 星算法规划出的路径相对较短, 但人员所受照射的总剂量代价和平均剂量代价都较高, 超过相关标准规定的职业照射剂量限值, 人员存在较大的辐射照射风险; 改进型 A 星算法规划出的路径虽然比传统 A 星算法规划出的路径多出 5.2m, 但人员在全过程所受照射的总剂量代价比传统算法降低了近 29 倍, 这使得工作人员在实际辐射环境下受到的辐射照射风险大大降低。因此, 改进型 A 星算法在典型二维不均匀辐射环境下规划出的路径更加安全、

可靠, 可应用于辐射环境下的路径规划。

3 结束语

为了在辐射环境下精确、合理的规划出一条最优路径, 最大限度的减少辐射照射危害, 保障操作人员的生命健康, 本文提出一种改进型 A 星算法引导的核辐射环境路径规划方法。仿真结果表明, 该方法能够在典型二维不均匀辐射环境中规划出一条无障碍、安全、可行的路径, 为核辐射环境下工作人员的路径规划提供相应的技术支持, 具有一定的

指导意义和参考价值。下一步,将在本工作的基础上,开展移动端以及三维空间中的路径规划方法研发,考虑根据实际剂量率分布的非均匀网格下的算法等工程应用研究工作。

致谢 感谢中广核工程有限公司唐邵华、熊俊、吕炜枫、刘杰等老师在仿真模拟过程中提供的信息参考及数据帮助,同时衷心感谢FDS凤麟核能团队其他成员的帮助和指导。

参考文献

- 1 Chao N, Liu Y K, Xia H, *et al.* Grid-based RRT* for minimum dose walking path-planning in complex radioactive environments[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, **115**: 73-82. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.01.007.
- 2 孟珠李, 焦俊, 李郑涛, 等. 基于A*与B样条算法的农用机器人路径规划系统[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2018, **42**(1): 45-53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2162.2018.01.006.
MENG Zhuli, JIAO Jun, LI Zhengtao, *et al.* Agricultural robot path planning system based on A* and B spline algorithm[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2018, **42**(1): 45-53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2162.2018.01.006.
- 3 张超超, 房建东. 基于定向加权A*算法的自主移动机器人路径规划[J]. *计算机应用*, 2017, **32**(S2): 77-81.
ZHANG Chaochao, FANG Jiandong. Path planning of autonomous mobile robot based on directional weighted A* algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, **32**(S2): 77-81.
- 4 Liu Y K, Li M K, Peng M J, *et al.* Walking path-planning method for multiple radiation areas[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, **94**: 808-813. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.04.043.
- 5 孙炜, 吕云峰, 唐宏伟, 等. 基于一种改进A*算法的移动机器人路径规划[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, **44**(4): 94-101. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2017.04.013.
SUN Wei, LYU Yunfeng, TANG Hongwei, *et al.* Mobile robot path planning based on an improved A* algorithm[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition)*, 2017, **44**(4): 94-101. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2017.04.013.
- 6 王志中. 复杂动态环境下自主机器人路径规划研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(1): 64-68. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2018.01.016.
- 7 WANG Zhizhong. Automatic robot path planning under complicit dynamic environment[J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2018(1): 64-68. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2018.01.016.
- 7 Wu Y, Cheng M, Wang W, *et al.* Development of Chinese female computational phantom Rad-Human and its application in radiation dosimetry assessment[J]. *Nuclear Technology*, 2018, **201**(2): 155-164. DOI: 10.1080/00295450.2017.1411717.
- 8 Liu Y K, Li M K, Xie C L, *et al.* Minimum dose method for walking-path planning of nuclear facilities[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, **83**: 161-171. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.04.019.
- 9 Wang Z, Cai J. The path-planning in radioactive environment of nuclear facilities using an improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, **326**: 79-86. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2017.11.006.
- 10 Guruji A K, Agarwal H, Parsediya D K. Time-efficient A* Algorithm for Robot Path Planning[J]. *Procedia Technology*, 2016, **23**: 144-149. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.03.010.
- 11 Wu Y, Bai Y, Song Y, *et al.* Development strategy and conceptual design of China Lead-based Research Reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, **87**: 511-516. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.08.015.
- 12 Wu Y C. Design and R&D progress of China Lead-based Reactor for ADS research facility[J]. *Engineering*, 2016, **2**(1): 124-131. DOI: 10.1016/j.eng.2016.01.023.
- 13 Wu Y. Design status and development strategy of China liquid lithium—lead blankets and related material technology[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, **367-370**: 1410-1415. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2007.04.031.
- 14 Wu Y. CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2009, **84**(7-11): 1987-1992. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.12.041.
- 15 Wu Y C, Song J, Zheng H Q, *et al.* CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, **82**(SI): 161-168. DOI: 10.1051/snamc/201406022.
- 16 吴宜灿, 宋婧, 胡丽琴, 等. 超级蒙特卡罗核计算仿真软件系统 SuperMC[J]. *核科学与工程*, 2016, **36**(1): 62-71. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.009.
WU Yican, SONG Jing, HU Liqin, *et al.* Super Monte Carlo simulation program for nuclear and radiation

- process: superMC[J]. Nuclear Science and Engineering, 2016, **36**(1): 62-71. DOI:10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.009.
- 17 龙鹏程, 罗月童, 邹俊, 等. 基于可编程图形处理器的可视化技术在中子学分析中的应用研究[J]. 核电子学与探测技术, 2010, **30**(8): 1042-1045. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.08.009.
- LONG Pengcheng, LUO Yuetong, ZOU Jun, *et al.* GPU-based visualization in neutronics analysis[J]. Nuclear Science and Detection Technology, 2010, **30**(8): 1042-1045. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.08.009.
- 18 何桃. 核与辐射安全集成仿真方法与技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- HE Tao. Study on the integrated simulation method and technology of nuclear and radiation safety[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- 19 Wu Y. Conceptual design of the China fusion power plant FDS-II[J]. Fusion Engineering and Design, 2008, **83**(10-12): 1683-1689. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.06.048.
- 20 Wu Y, Jiang J, Wang M, *et al.* A fusion-driven subcritical system concept based on viable technologies[J]. Nuclear Fusion, 2011, **51**(10): 103036. DOI: 10.1088/0029-5515/51/10/103036.
- 21 Huang Q, Baluc N, Dai Y, *et al.* Recent progress of R&D activities on reduced activation ferritic/martensitic steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, **442**(1-3): S2-S8. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2012.12.039.
- 22 Huang Q, Li C, Li Y, *et al.* Progress in development of China Low Activation Martensitic steel for fusion application[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, **367-370**: 142-146. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2007.03.153.
- 23 Huang Q Y. Status and improvement of CLAM for nuclear application[J]. Nuclear Fusion, 2017, **57**(8): 086042. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.08.055.
- 24 Wu Y C, Liu C, Song G, *et al.* Development of high intensity D-T fusion neutron generator (HINEG)[J]. International Journal of Energy Research, 2017, **42**(1): 68-72. DOI: 10.1051/epjconf/201715303006.
- 25 吴宜灿, 刘超, 宋钢, 等. 强流氘氘聚变中子源 HINEG 设计研究[J]. 核科学与工程, 2016, **36**(1): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.011.
- WU Yican, LIU Chao, SONG Gang, *et al.* Design study of high intensity D-T fusion neutron generator HINEG[J]. Nuclear Science and Engineering, 2016, **36**(S1): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.011.
- 26 Wu Y, Chen Z, Hu L, *et al.* Identification of safety gaps for fusion demonstration reactors[J]. 2016, **1**(12): 16154. DOI: 10.1038/nenergy.2016.154.
- 27 Wu Y, Long P, Yu S, *et al.* Depth peeling based nuclear radiation shield calculation grid generation method and system: US20180018407[P]. 2018.
- 28 Long P C, Zeng Q, He T, *et al.* Development of a geometry-coupled visual analysis system for MCNP[J]. Progress in Nuclear Science and Technology, 2011, **2**: 280-283. DOI: 10.15669/pnst.2.280.
- 29 Wang D, Song J, Yu S P, *et al.* CAD-based Monte Carlo automatic modeling method based on primitive solid[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, **87**: 162-166. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.07.041.
- 30 唐邵华, 吕炜枫, 刘杰, 等. 核电站三维剂量场评价系统的开发及应用[J]. 辐射防护, 2017, **37**(5): 347-354.
- TANG Shaohua, LYU Weifeng, LIU Jie, *et al.* Development and application of 3D dose rate field evaluation system [J]. Radiation Protection, 2017, **37**(5): 347-354.